DOI:10.11931/guihaia.gxzw202406025

濒危植物小勾儿茶及其变种毛柄小勾儿茶的种群结构与动态特征

庞江豪[1,2]，王业清[3]，唐云龙[4]，张 东[1]，吴 浩[1,2]，魏新增[1,2,*]，江明喜[1,2]
（1.中国科学院水生植物与流域生态重点实验室，中国科学院武汉植物园，武汉 430074；2.中国科学院大学，北京 100049；3.湖北五峰后河国家级自然保护区管理局，湖北 五峰 443400；
4.安徽省绩溪清凉峰自然保护区管理站，安徽 宣城 245300）

摘 要：探究濒危植物小勾儿茶(*Berchemiella wilsonii*)及其变种毛柄小勾儿茶(*Berchemiella wilsonii* var. *pubipetiolata*)的种群结构及动态特征，可为其种质资源保护利用提供科学依据。该研究以湖北、安徽、浙江现存有记录的小勾儿茶和毛柄小勾儿茶野生种群为研究对象，基于种群生态学调查绘制种群结构图、建立静态生命表、拟合存活曲线、分析种群生存力、计算种群动态变化指数、开展时间序列预测分析，以期揭示两个物种的种群结构特征与未来发展趋势。结果显示：(1)小勾儿茶种群结构为幼龄个体占比较高的金字塔型，但其幼体在成长过程中损耗较大，成体较少；毛柄小勾儿茶种群幼龄个体缺乏，中龄个体占比高，老龄个体稀少，呈纺锤型结构。(2)经模型检验发现两个物种的存活曲线均趋近于 Deevey-III 型，表明二者幼龄阶段有较高的死亡率；由于达到生理年龄，两物种的死亡率都在 VI 龄级达到峰值。(3)小勾儿茶种群的生存率和累积死亡率在 II 龄级达到平衡，毛柄小勾儿茶则在 VI 龄级达到平衡，表明小勾儿茶更早进入衰退期。(4)种群动态指数显示二者都属于易受外界干扰的增长型种群，对干扰具有较高的敏感性。(5)时间序列预测显示：在经历 2、4、6、8 龄级后, 小勾儿茶种群的个体数量在每个龄级中均有不同程度的增加，而毛柄小勾儿茶种群幼龄个体缺乏，中龄个体减少，成龄个体增加，种群面临衰退。综上认为，对于二者应采取不同的保护对策，小勾儿茶种群幼苗死亡率高，应进行适当疏林以提高光照，促进幼苗存活，同时减少人为干扰；毛柄小勾儿茶幼体严重缺失，应加强人工繁育技术的研究，及时补充幼苗回归保育，以避免种群衰退和实现物种多样性资源的保护利用。

关键词：小勾儿茶，毛柄小勾儿茶，种群结构，静态生命表，存活曲线，动态指数，时间序列预测

Population structure and dynamic characteristics of an endangered plant species (*Berchemiella wilsonii*) and its variety (*Berchemiella wilsonii* var. *pubipetiolata*)

PANG Jianghao[1,2], WANG Yeqing[3], TANG Yunlong[4], ZHANG Dong[1], WU Hao[1,2],
WEI Xinzeng[1,2,*], JIANG Mingxi[1,2]

(1. *Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences,* Wuhan 430074, China; 2. *University of Chinese Academy of Sciences,* Beijing 100049, China; 3. *Hubei Wufeng Houhe National Nature Reserve Administration,* Wufeng 443400, Hubei, China; 4.*Jixi Management Station of Anhui Qingliangfeng National Nature Reserve,* Xuancheng 245300, Anhui, China)

Abstract： Understanding population structure and dynamic characteristics of rare and endangered species is

基金项目：国家自然科学基金项目（32371653，32001225）；湖北五峰后河国家级自然保护区 2023 年中央林业草原生态保护恢复资金国家重点野生动植物保护补助项目（YCZ1960-202301-02F）。

第一作者：庞江豪（2000—），硕士研究生，研究方向为保护生物学，（E-mail）pangjianghao23@ucas.ac.cn。
* **通信作者**：魏新增，博士，研究员，研究方向为保护生物学，（E-mail）xzwei@wbgcas.cn。

crucial for providing theoretical bases for their conservation and management. In this study, we conducted field investigations of an endangered plant species (*Berchemiella wilsonii*) and its variety (*B. wilsonii* var. *pubipetiolata*) across their entire distribution ranges in China, including Hubei, Anhui, and Zhejiang provinces. We drew the population structure diagrams and designed the static life tables. Subsequently, we fitted and plotted survival curves for survival analysis and used time series model to predict the population development trends. The results were as follows: (1) The age class structure of *B. wilsonii* was irregular pyramid mold and that of *B. wilsonii* var. *pubipetiolata* was a spindle-shaped structure. (2) The survival curves of the two species tended to be the Deevey-III type, indicating the high mortality rate at the juvenile stage. For both species, the mortality rate reached the peak at the age class VI. (3) The survival rate and cumulative mortality rate showed that *B. wilsonii* entered the declining stage earlier than *B. wilsonii* var. *pubipetiolata*. (4) The dynamic index suggested that populations of these two species are increasing, but they are sensitive to external disturbance. (5) Time series prediction indicated that the number of individuals at each age class of *B. wilsonii* will increase with uneven degrees after the next 2, 4, 6 and 8 age classes. However, the number of young-, middle-, and mature-aged individuals of *B. wilsonii* var. *pubipetiolata* will disappear, decrease and increase in the future, respectively. Therefore, we should adopt different conservation strategies for the two species. For *B. wilsonii*, appropriate forest thinning should be carried out to improve light conditions, and human disturbance should be reduced to promote the seedling survival. For *B. wilsonii* var. *pubipetiolata*, it is necessary to strengthen research on artificial propagation technology and supplement the seedlings timely in the wild to alleviate population decline.
Key words: *Berchemiella wilsonii*, *B. wilsonii* var. *pubipetiolata*, population structure, static life table, survival curve, dynamic index, time series prediction

近年来，由于人类活动造成的过度开发、环境污染和气候变暖等原因，物种正在以远超估计的速度灭绝（Jurriaan et al.,2015；Maeques et al., 2019; 王鸣雷等，2024）。在我国 3 万多种高等植物中，受到威胁的物种占 15%~20%，与物种保护相关的研究工作正在持续进行（覃海宁和赵莉娜，2017；徐卫华等，2023；Mallapaty, 2020）。以种群为单位开展物种保护工作是实现科学保护的有效途径，种群结构和动态规律是种群最基本的特征，也是种群生态学研究的基础科学问题，在濒危植物的研究中至关重要（朱培高等，2024；王雨婷等，2024）。种群结构涉及到种群内个体的年龄、大小和数量分布情况，能反映种群的生存现状（王世彤等，2018）；种群动态是种群大小和数量结构在时间和空间上的变化规律，其有助于进一步预测种群的发展趋势（Wei et al., 2015; Chhetri et al., 2016）。目前，国内学者开展了大量种群结构和动态变化的研究，对濒危植物的保护和管理具有重要意义。例如，王世彤等（2022）通过对极小种群植物长果安息香（*Changiostyrax dolichocarpus*）进行种群结构分析，发现其种群存在衰退趋势；袁春明等（2022）对濒危植物景东翅子树（*Pterospermum kingtungense*）的研究发现种群结构的改变会影响其种群动态；喻丁香等（2018）对铁竹（*Ferrocalamus strictus*）种群结构和群落特征的研究表明在环境理想的条件下种群数量会不断扩大。其中，静态生命表是种群数量动态研究的核心，通过对生命表的分析可以反映种群的生存现状和种群对环境的适应性，其生存率、死亡密度、危险率等信息可以直观地展示不同年龄阶段个体存活能力的差异。以生命表为基础进一步研究动态指数和时间序列预测结果，可以预测种群未来发展趋势（Schenk et al., 2003），帮助理解种群内部、种群与环境之间的相互作用，为制定有效的物种保护策略提供科学依据。

小勾儿茶（*Berchemiella wilsonii*）隶属于鼠李科小勾儿茶属，为国家二级重点保护野生植物。该物种于 1907 年在湖北兴山首次被发现，之后曾一度被认为已经灭绝，直到本世纪初才在湖北五峰后河自然保护区被重新发现（李建强等，2004），此后在湖北其他地区以及浙江省局部区域被陆续发现并报道（甘啟良和关良福，2007；李华东等，2012）。小勾儿茶为落叶乔木，生长于海拔 600~1300 m 左右的阔叶林中，以尖连蕊茶（*Camellia cuspidata*）、小叶青冈（*Quercus myrsinifolia*）、紫楠（*Phoebe sheareri*）、白楠（*Phoebe*

neurantha）、曼青冈（*Quercus oxyodon*）、木荷（*Schima superba*）等常绿植物和君迁子（*Diospyros lotus*）、泡花树（*Meliosma cuneifolia*）、湖北枫杨（*Pterocarya hupehensis*）、金钱槭（*Dipteronia sinensis*）、亮叶桦（*Betula luminifera*）等落叶植物为优势种，小勾儿茶为群落的伴生种，喜温暖湿润的生境，处于群落最高层或生于排水良好的沟谷中下部，能获取充足的阳光而得以生存。目前对小勾儿茶的研究主要包括引种栽培（刘赛，2018）、配子发育（王康鑫等，2024）和群落特征（胡理乐等，2003）等方面。毛柄小勾儿茶（*Berchemiella wilsonii* var. *pubipetiolata*）为小勾儿茶的变种，主要分布在安徽省和浙江省局部区域（康明，2006；章学农等，2023）。与小勾儿茶具有相似的生活习性和生境特征，同样为群落的伴生种，耐阴性差，对水分要求较高，生态位狭窄，与群落中优势种重叠小，通过生态位特化获得生存资源。二者在形态上有以下区别：小勾儿茶叶柄长 4~5 mm，无毛，叶背仅脉腋微被柔毛；毛柄小勾儿茶叶柄长仅 2~3 mm，被柔毛，叶背有较密柔毛。当前对毛柄小勾儿茶的研究集中在遗传多样性（许凤华等，2006；Kang et al., 2005, 2006）、生态位（史红文等，2007）、种子萌发（党海山等，2005）及生境特征（谢峰淋等，2019）等方面。目前小勾儿茶和毛柄小勾儿茶的种群结构和动态尚未被报道，因此本研究对小勾儿茶和毛柄小勾儿茶种群进行调查采样，采用静态生命表、存活曲线、动态变化指数、时间序列预测等方法进行对比分析，旨在探究以下科学问题：(1) 现存小勾儿茶和毛柄小勾儿茶种群的数量特征和生存状况；(2) 小勾儿茶和毛柄小勾儿茶种群的未来发展趋势；(3) 小勾儿茶和毛柄小勾儿茶种群的濒危机制和保护对策。研究结果将为其保护工作的重点、方向以及开发利用提供科学依据，同时为珍稀濒危植物的保护提供研究案例。

1 材料与方法

1.1 野外调查

根据相关文献资料记载，小勾儿茶主要分布在湖北省西部山区和浙江嵊州，毛柄小勾儿茶主要分布在安徽和浙江局部区域（图 1），本研究根据两个物种的现有分布地点，进行实地踏察采样（表 1）。调查记录小勾儿茶和毛柄小勾儿茶的胸径(DBH)、生长状态、经纬度、海拔以及生境特征。

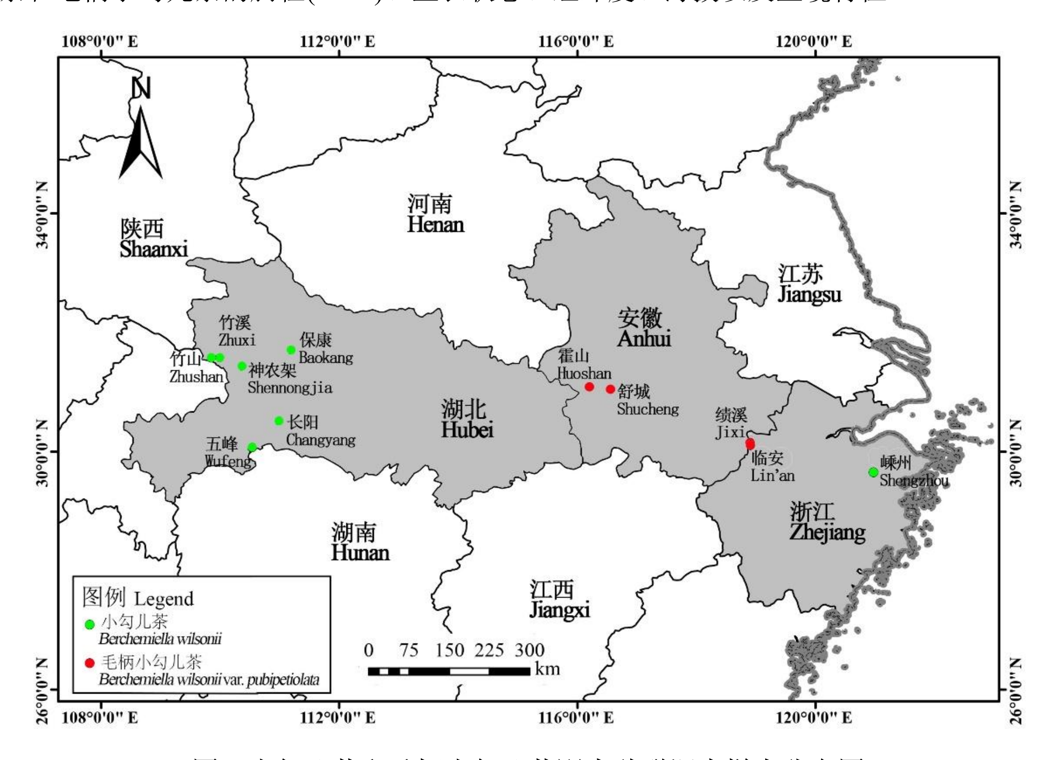


图 1 小勾儿茶和毛柄小勾儿茶野生种群调查样点分布图

Fig. 1 Distribution map of the sampling populations of *Berchemiella wilsonii* and *B. wilsonii* var. *pubipetiolata*

表 1 小勾儿茶和毛柄小勾儿茶调查信息表

Table 1 Site characteristics and sample size of the sampling populations of *Berchemiella wilsonii* and *B. wilsonii*

var. *pubipetiolata*

物种 Species	地点 Location	样本量 Number of samples	经纬度 Latitude and longitude	海拔范围 Altitude range（m）
小勾儿茶 *Berchemiella wilsonii*	湖北省五峰县后河 Houhe, Wufeng County, Hubei Province	7	110°32′E，30°04′N	1 190~1 386
	湖北省长阳县清江方山 Qingjiang Fangshan, Changyang County, Hubei Province	3	110°59′E，30°30′N	695~764
	湖北省神农架 Shennongjia, Hubei Province	7	110°23′E，31°28′N	1 210~1 406
	湖北省保康县五道峡 Wudaoxia, Baokang County, Hubei Province	21	111°11′E，31°42′N	1 172~1 211
	湖北省竹山县堵河源 Duheyuan, Zhushan County, Hubei Province	7	110°00′E，31°34′N	1 041~1 059
	湖北省竹溪县十八里长峡 Shibalichangxia, Zhuxi County, Hubei Province	16	109°47′E，31°35′N	1 045~1 294
	浙江省嵊州市四明山 Siming Mountain, Shengzhou City, Zhejiang Province	10	120°58′E，29°38′N	644~693
毛柄小勾儿茶 *Berchemiella wilsonii* var. *pubipetiolata*	安徽省霍山县马家河 Majiahe, Huoshan County, Anhui Province	16	116°11′E，31°05′N	929~1 105
	安徽省舒城县万佛山 Wanfo Mountain, Shucheng County Anhui Province	7	116°32′E，31°03′N	563~905
	安徽省绩溪县清凉峰 Qingliangfeng, Jixi County, Anhui Province	22	118°53′E，30°08′N	645~815
	浙江省临安区龙塘山 Longtang Mountain, Lin'an District, Zhejiang Province	11	118°53′E，30°06′N	890~936

1.2 数据分析

1.2.1 种群年龄结构划分

获取木芯的方式对于个体稀少的濒危木本植物种群破坏较大（刘海燕等，2015），通常采用“空间代替时间”的方法, 即用径级代替龄级划分年龄结构（朱学雷等，1999）, 小勾儿茶及其变种毛柄小勾儿茶多为小乔木，少有分枝，故在年龄结构划分中取离基部 1.3 m 处的胸径(DBH)作为依据。根据研究调查所得数据, 并结合物种的野外生长发育状况，将株高不足 1.3 m 和 DBH<2.5 cm 作为第 I 级，其后, 以 DBH = 5 cm 作为步长增加一级（魏新增等，2008）, 即 2.5 cm ≤ DBH < 7.5 cm 作为第 II 级，以此类推，将小勾儿茶和毛柄小勾儿茶种群划分为 8 个龄级。分别以两个种群的龄级为纵坐标，各龄级个体数为横坐标绘制条形图。

1.2.2 种群静态生命表及存活曲线

静态生命表是根据某一时刻的横截面数据编制的，由于濒危植物个体数量稀少，种群大小和年龄结构具有不稳定性，在生命表中会出现死亡率为负的情况，与数学假设不符。在很多研究中，为避免出现负值，会对数据进行匀滑修正（吴承祯等，2000；张志祥等，2008；王立龙等，2015），但当种群各龄级个体数量差距较大时，匀滑处理往往会掩盖真实信息，不做处理更有利于反映种群现状（赵阳等，2020；刁云飞等，2020）。结合本研究的数据特点，在此未对数据做匀滑处理，直接根据划分的各龄级个体数编制静态生命表（张婕等，2014）。以龄级为横坐标, 标准化存活个体数的对数(lnl_x)为纵坐标绘制两个物种的存活曲线，采用指数函数方程($a_x = a_0e^{-bx}$),和幂函数方程($a_x = a_0x^{-b}$)对两个物种的存活曲线进行模型检验，分别描述 Deevey-Ⅱ和 Deevey-Ⅲ型存活曲线，依据决定系数、F 检验值来判定模型拟合效果(Hett et al., 1976)。

1.2.3 种群生存力分析

为进一步揭示小勾儿茶和毛柄小勾儿茶种群的结构动态变化情况，引入种群生存率(S_i)、累积死亡率(F_i)、死亡密度(f_{ti})以及危险率(λ_{ti})对种群进行生存分析（杨凤翔等，1991），公式如下：

$$S_i = S_1 \times S_2 \times S_3 \cdots \times S_i \tag{1}$$

$$F_i = 1 - S_i \tag{2}$$

$$f_{ti} = \frac{S_{i-1} - S_i}{h_i} \tag{3}$$

$$\lambda_{ti} = \frac{2(1 - S_i)}{h_i(1 + S_i)} \tag{4}$$

式中：S_i为第 i 龄级种群存活率；$S_i = l_{i+1} / l_i$；h_i为龄级宽度。

1.2.4 种群动态量化分析

种群动态量化分析是根据种群内相邻两龄级间个体数量变化动态指数(V_n)、不考虑外部干扰时种群的数量动态变化指数(V_{pi})、考虑外部干扰时种群的数量动态变化指数(V'_{pi})和种群承担随机干扰风险概率极大值($P_{\max}$)对种群动态进行定量描述（陈晓德，1998），计算公式如下：

$$V_n = \frac{A_x - A_{x+1}}{\max(A_x, A_{x+1})} \times 100\% \tag{5}$$

$$V_{pi} = \frac{1}{\sum_{x=1}^{K-1} A_x} \sum_{x-1}^{K-1} (A_x \times V_n) \tag{6}$$

$$V'_{pi} = \frac{\sum_{x=1}^{K-1} (A_x \times V_n)}{K \times \min(A_1, A_2, \cdots, A_K) \sum_{x=1}^{K-1} A_x} \tag{7}$$

$$P_{max} = \frac{1}{k\min(A_1, A_2, \cdots, A_k)} \tag{8}$$

式中：A_x、A_{x+1}分别为第 x、$x+1$ 龄级种群个体数；K 为年龄级数。

1.2.5 种群数量时间序列预测

采用一次移动平均法预测小勾儿茶和毛柄小勾儿茶种群经过 2、4、6、8 个龄级后的种群数量动态（张文辉等，2004），计算公式如下：

$$M_x = \frac{1}{t} \sum_{k=x-t+1}^{x} A_x \tag{9}$$

式中：x 为龄级；t 为预测时间年限；A_x为 x 龄级的种群存活数量；Mx 为经过 t 年时 x 龄级的种群大小预测值。

2 结果和分析

2.1 年龄结构

调查共记录到 71 株小勾儿茶和 56 株毛柄小勾儿茶的个体数据。小勾儿茶种群龄级结构（图 2：A）呈不规则金字塔型，幼龄个体占比高，第 I、II 龄级个体数量分别占总数的 28%、27%，第 III 龄级个体数陡然减少，随后呈现平缓减少趋势；毛柄小勾儿茶种群龄级结构（图 2：B）呈纺锤型，个体数量先增高后减少，I 龄级个体缺失，峰值出现在第 IV、V 龄级，个体数量分别占总数的 32%、27%。

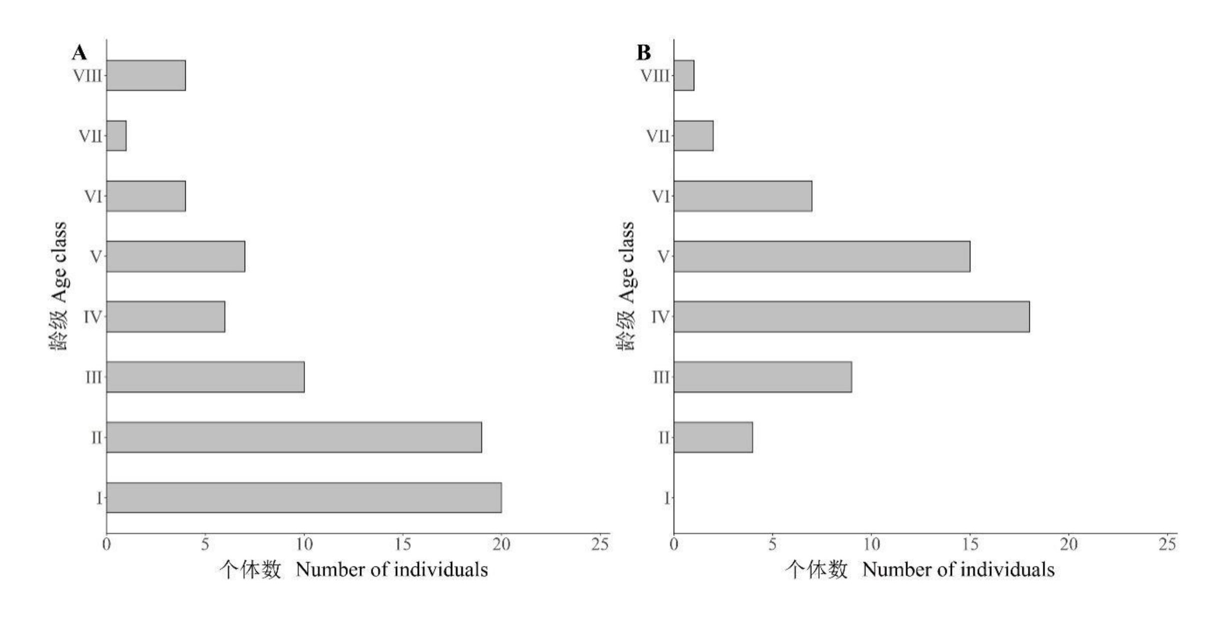


图 2 小勾儿茶(A)和毛柄小勾儿茶(B)种群龄级结构图

Fig. 2 Age class structure of *Berchemiella wilsonii* (**A**) and *B. wilsonii* var. *pubipetiolata* (**B**) populations

2.2 种群静态生命表和存活曲线

两个物种的静态生命表（表 2）显示：随着龄级的增加，小勾儿茶的存活数量呈减少趋势，生命期望表现出波动性，第 II、VI 龄级的生命期望与其相邻龄级相比明显较低；毛柄小勾儿茶的存活数量先增加后减少，生命期望逐渐降低，II、III 龄级的降低幅度较大，随后平缓下降。从死亡率和消失率曲线可以看出（图 3），小勾儿茶的死亡率和消失率随龄级增加呈升高-降低-升高-降低的变化趋势，II 龄级出现死亡率的一个高峰，VI 龄级死亡率达到最大值，表明小勾儿茶种群从幼龄过渡到中龄阶段损耗较大（图 3：A）。随着龄级的增加，毛柄小勾儿茶的死亡率和消失率先升高后降低，最大死亡率出现在第 VI 龄级（图 3：B）。

两个物种的存活曲线变化趋势有所不同，小勾儿茶种群存活曲线（图 4：A）呈现下降趋势，在 III、VII 龄级降幅剧烈，毛柄小勾儿茶存活曲线（图 4：B）先升高后降低。对其进行模型检验（表 3），两个种群的幂函数模型 R^2 均大于指数函数模型，因此判断小勾儿茶和毛柄小勾儿茶的种群存活曲线更趋近于 Deevey-III 型，表现为幼龄阶段死亡率高。

表 2 小勾儿茶和毛柄小勾儿茶的静态生命表

Table 2 Static life tables of *Berchemiella wilsonii* and *B. wilsonii* var. *pubipetiolata*

物种 Species	径级 DBH class	龄级 Age class	A_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	k_x	S_x
小勾儿茶	DBH <2.5	Ⅰ	20	1 000	6.908	50	0.050	975	2 950	2.950	0.051	0.950
Berchemiella	2.5≤ DBH <7.5	Ⅱ	19	950	6.856	450	0.474	725	1 975	2.079	0.642	0.526
wilsonii	7.5≤ DBH <12.5	Ⅲ	10	500	6.215	200	0.400	400	1 250	2.500	0.511	0.600
	12.5≤ DBH <17.5	Ⅳ	6	300	5.704	–50	–0.167	325	850	2.833	–0.154	1.167
	17.5≤ DBH <22.5	Ⅴ	7	350	5.858	150	0.429	275	525	1.500	0.560	0.571
	22.5≤ DBH <27.5	Ⅵ	4	200	5.298	150	0.750	125	250	1.250	1.386	0.250
	27.5≤ DBH <32.5	Ⅶ	1	50	3.912	–150	–3.000	125	125	2.500	–1.386	4.000
	DBH ≥ 32.5	Ⅷ	4	200	5.298	—	—	—	—	—	—	—
毛柄小勾	DBH <2.5	Ⅰ	0	—	—	—		—	—	—	—	—
儿茶	2.5≤ DBH <7.5	Ⅱ	4	1 000	6.908	–1 250	–1.250	1 625	13 375	13.375	–0.811	2.250

物种 Species	径级 DBH class	龄级 Age class	A_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	k_x	S_x
B.	7.5≤ DBH <12.5	Ⅲ	9	2 250	7.719	–2 250	–1.000	3 375	11 750	5.222	–0.693	2.000
wilsonii var.	12.5≤ DBH <17.5	Ⅳ	18	4 500	8.412	750	0.167	4 125	8 375	1.861	0.182	0.833
pubipetiolata	17.5≤ DBH <22.5	Ⅴ	15	3 750	8.230	2 000	0.533	2 750	4 250	1.133	0.762	0.467
	22.5≤ DBH <27.5	Ⅵ	7	1 750	7.467	1 250	0.714	1 125	1 500	0.857	1.253	0.286
	27.5≤ DBH <32.5	Ⅶ	2	500	6.215	250	0.500	375	375	0.750	0.693	0.500
	DBH ≥ 32.5	Ⅷ	1	250	5.521	—	—	—	—	—	—	—

DBH.胸径；$\boldsymbol{A_x}$.实际存活个体数；$\boldsymbol{l_x}$.标准化存活个体数；$\boldsymbol{\ln l_x}$.标准化存活个体数的对数；$\boldsymbol{d_x}$.标准化死亡个体数；$\boldsymbol{q_x}$.死亡率；$\boldsymbol{L_x}$. x 到 x+1 龄级间隔期间存活个体数；$\boldsymbol{T_x}$.第 x 龄级到超过第 x 龄级的个体总数；$\boldsymbol{e_x}$.生命期望；$\boldsymbol{K_x}$.消失率；$\boldsymbol{S_x}$.存活率。

DBH. Diameter at breast height; $\boldsymbol{A_x}$. Actual survival number; $\boldsymbol{l_x}$. Standardized survivals; $\boldsymbol{\ln l_x}$. The logarithm of standardized survivals; $\boldsymbol{d_x}$. Standardized deaths; $\boldsymbol{q_x}$. Mortality rate; $\boldsymbol{L_x}$. Survived individuals of the interval from x to x+1; $\boldsymbol{T_x}$. Total number of individuals from level x to greater than level x; $\boldsymbol{e_x}$. Life expectancy; $\boldsymbol{K_x}$. Killing rate; $\boldsymbol{S_x}$. Survival rate.

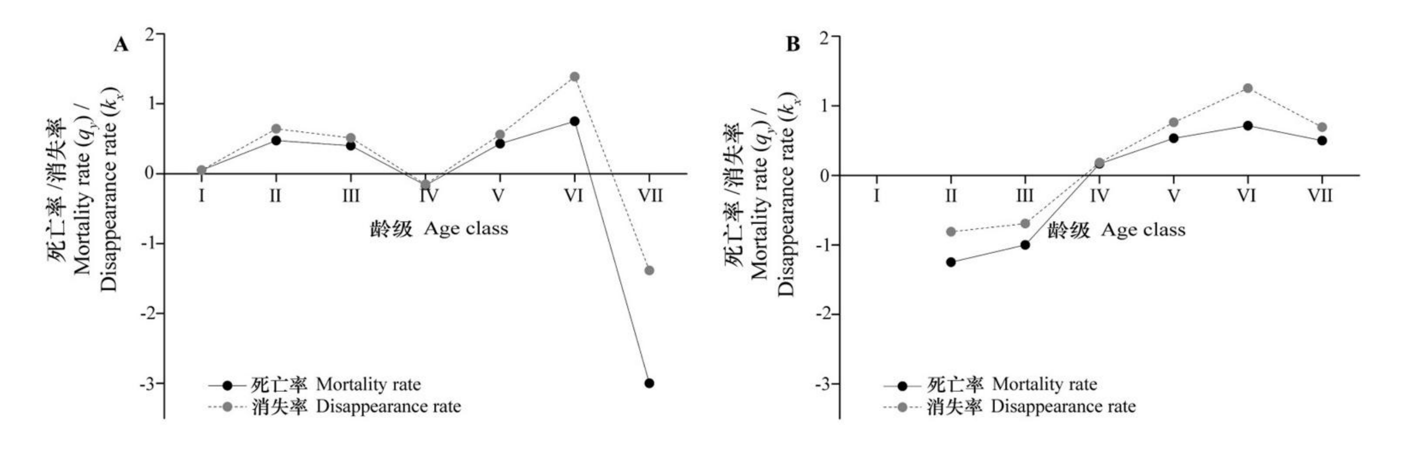


图 3 小勾儿茶(A)和毛柄小勾儿茶(B)种群的死亡率和消失率曲线

Fig. 3 Mortality and disappearance curves of *Berchemiella wilsonii* (**A**) and *B.wilsonii* var. *pubipetiolata* (**B**) populations

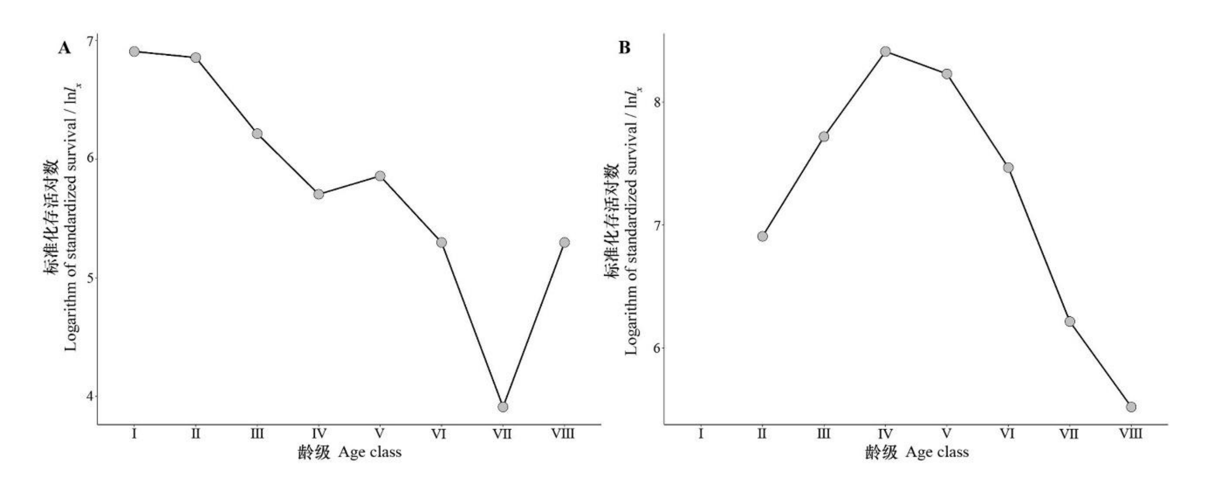


图 4 小勾儿茶(A)和毛柄小勾儿茶(B)种群存活曲线

Fig. 4 Survival curves of *Berchemiella wilsonii* (**A**) and *B. wilsonii* var. *pubipetiolata* (**B**) populations

表 3 小勾儿茶和毛柄小勾儿茶种群存活曲线的检验模型

Table 3 Test models of survival curves of *Berchemiella wilsonii* and *B. wilsonii* var. *Pubipetiolata* populations

物种 Species	存活曲线方程 Survival curve equation	R^2	F	p	类型 Type
小勾儿茶 *Berchemiella wilsonii*	$y= 7.440e^{-0.204x}$	0.622	9.865	0.020	Deevey-III
	$y= 7.468x^{-0.061}$	0.673	12.327	0.013	
毛柄小勾儿茶 *B. wilsonii* var. *pubipetiolata*	$y= 8.843e^{-0.141x}$	0.205	1.289	0.308	Deevey-III
	$y= 8.886x^{-0.044}$	0.378	3.044	0.141	

2.3 种群生存力分析

随龄级增加，小勾儿茶种群的生存率逐渐下降（图 5：A），毛柄小勾儿茶种群的生存率从 II 到 III 龄级上升，而后随龄级增加逐渐下降（图 5：B），两个种群的累计死亡率与其生存率均呈互补状态。小勾儿茶种群的生存率和累计死亡率在 II 龄级达到平衡，表明幼苗生存能力差, 成活率低, 种群进入衰退期的时间较早。毛柄小勾儿茶种群的生存率和累计死亡率在 VI 龄级达到平衡，进入衰退期较晚。

小勾儿茶种群的死亡密度曲线（图 6：A）波动较为平缓，前期死亡密度稍高于后期，危险率随龄级增加呈上升趋势，III 龄级出现第一个峰值，VI 龄级达到最高峰，表明小勾儿茶在 III、VI 龄级阶段面临较大的生存压力；毛柄小勾儿茶种群的死亡密度曲线（图 6：B）随龄级增加先上升后下降，变化幅度相对较大，最大死亡密度出现在第 V 龄级，危险率在前期变化幅度小，从 V 龄级开始剧烈上升，表明毛柄小勾儿茶在 V 龄级以后面临较大的生存压力。

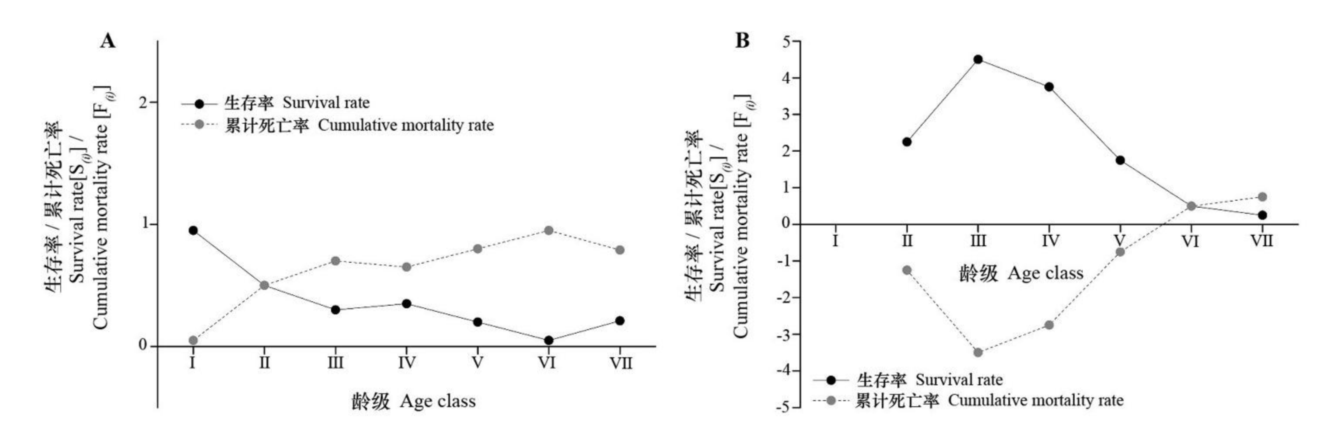


图 5 小勾儿茶(A)和毛柄小勾儿茶(B)种群的生存率和累计死亡率曲线

Fig. 5 Survival rate and cumulative mortality rate of *Berchemiella wilsonii* (**A**) and *B. wilsonii* var. *pubipetiolata* (**B**) populations

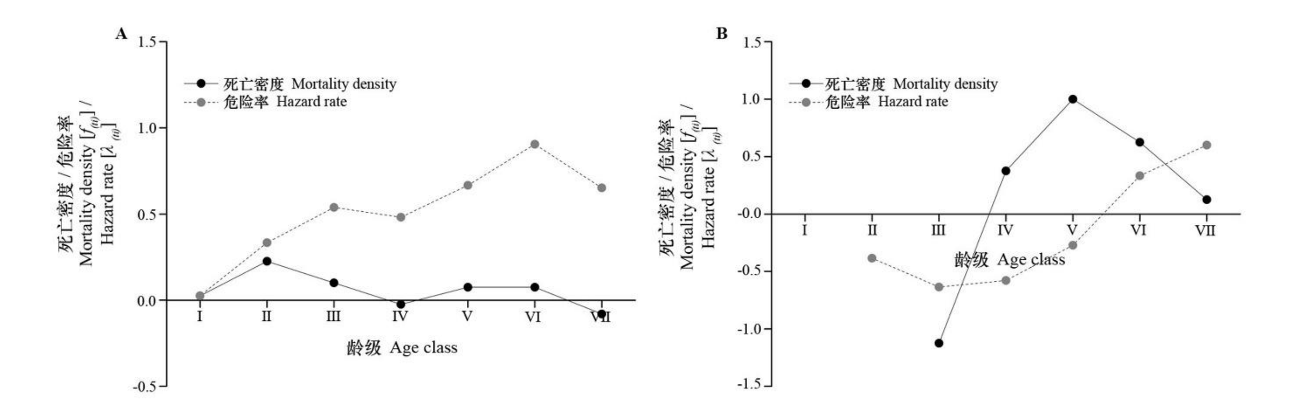


图 6 小勾儿茶(A)和毛柄小勾儿茶(B)种群的死亡密度和危险率曲线

Fig. 6 Mortality density rate and hazard rate of *Berchemiella wilsonii* (**A**) and *B. wilsonii* var. *pubipetiolata* (**B**) populations

2.4 种群动态量化分析

从表中可以看出（表 4），小勾儿茶种群除 IV、VII 龄级外，各龄级的数量动态变化指数均为正；毛柄小勾儿茶 I-III 龄级的数量动态变化指数为负值，其余各龄级的数量动态变化指数均为正。小勾儿茶种群整体的数量动态变化指数 V_{pi}、V'_{pi} 均大于毛柄小勾儿茶，说明小勾儿茶的种群动态优于毛柄小勾儿茶种群。两个物种的随机干扰风险概率极大值 $P_{\max}$ 均为 0.13%，说明二者种群稳定性较差，对外界干扰具有较高的敏感性。

表 4 小勾儿茶和毛柄小勾儿茶种群动态变化指数

Table 4 Dynamic index of *Berchemiella wilsonii* and *B. wilsonii* var. *pubipetiolata*

动态指数级 Dynamic index class	动态指数 Dynamic index value (%)	
	小勾儿茶 *Berchemiella wilsonii*	毛柄小勾儿茶 *B. wilsonii* var. *pubipetiolata*
V_1	5.00	–100.00
V_2	47.37	–55.56
V_3	40.00	–50.00
V_4	–14.29	16.67
V_5	42.86	53.33
V_6	75.00	71.43
V_7	–75.00	50.00
V_{pi}	27.45	18.69
V'_{pi}	3.43	2.34
$P_{\max}$	0.13	0.13

V_1-V_7. 相邻两龄级间个体数量变化动态指数；V_{pi}. 不考虑外部干扰时种群的数量动态变化指数；V'_{pi}. 考虑外部干扰时种群的数量动态变化指数；$P_{\max}$. 随机干扰风险概率极大值。

V_1-V_7. Dynamic index of quantitative change between adjacent age classes; V_{pi}. Dynamic index without external interference; V'_{pi}. Dynamic index with external interference; $P_{\max}$. The maximum of probability in random disturbance.

2.5 种群数量时间序列预测

种群数量动态时间序列预测结果显示（表 5），在经过 2、4、6、8 个龄级后，小勾儿茶各龄级数量均有明显增加趋势；毛柄小勾儿茶种群 II~V 龄级数量呈减少趋势，VI~VIII 龄级数量呈增加趋势，I~III 龄级个体数缺失显著。表明在未来一段时间，小勾儿茶种群数量在环境条件稳定的前提下将保持增长趋势，毛柄小勾儿茶种群由于缺乏幼苗补充更新，现有个体逐渐过渡到成龄阶段，将表现出幼龄个体缺乏，成龄个体增多，种群将呈现衰退趋势。

表 5 小勾儿茶和毛柄小勾儿茶种群数量动态时间序列预测

Table 5Time sequence prediction of number dynamics of *Berchemiella wilsonii* and *B. wilsonii* var. *Pubipetiolata* populations

龄级 Age class	小勾儿茶 *Berchemiella wilsonii*					毛柄小勾儿茶 *B. wilsonii* var. *pubipetiolata*				
	M_0	M_2	M_4	M_6	M_8	M_0	M_2	M_4	M_6	M_8
Ⅰ	20	—	—	—	—	0	—	—	—	—
Ⅱ	19	20	—	—	—	4	2	—	—	—
Ⅲ	10	15	—	—	—	9	7	—	—	—
Ⅳ	6	8	14	—	—	18	14	8	—	—
Ⅴ	7	7	11	—	—	15	17	12	—	—
Ⅵ	4	6	7	11	—	7	11	12	9	—
Ⅶ	1	3	5	8	—	2	5	11	9	—
Ⅷ	4	3	4	5	9	1	2	6	9	7

$\boldsymbol{M_0}$. 原始存活数；$\boldsymbol{M_2}$、$\boldsymbol{M_4}$、$\boldsymbol{M_6}$、$\boldsymbol{M_8}$. 经过 2、4、6、8 个龄级时间后各龄级种群大小的预测值。

$\boldsymbol{M_0}$. Number of original survivals; $\boldsymbol{M_2}$, $\boldsymbol{M_4}$, $\boldsymbol{M_6}$, $\boldsymbol{M_8}$. The number of individuals in each age class after the population has developed from 2, 4, 6, 8 age classes, respectively.

3 讨论

3.1 小勾儿茶种群金字塔型和毛柄小勾儿茶种群纺锤型龄级结构

小勾儿茶种群中幼龄个体占比高，中龄和成龄个体较少，龄级结构呈不规则金字塔型，种群表现为增长趋势，最显著的特征是从幼龄向中龄过渡阶段死亡率高；而毛柄小勾儿茶种群中 I 龄级个体缺失，幼龄级个体稀少，中龄个体占比高，龄级结构呈纺锤型，种群面临较大的衰退风险。两个种群的存活曲线都是 Deevey-III 型，表现出幼苗死亡率高的特征，这与珍稀植物紫椴（*Tilia amurensis*）（张金峰等，2022）和峨眉含笑（*Michelia wilsonii*）（秦爱丽等，2020）的研究结果一致，但二者死亡率高的机制有所差异。小勾儿茶种群幼苗储备相对充足，但存活率低，相关研究表明，小勾儿茶幼苗对光照和水分要求较高，喜光照且不耐阴，其所处生境郁闭度高，种间竞争强烈，使小勾儿茶难以正常度过幼苗阶段（孙哲明等，2022）。从生命表可以看到，毛柄小勾儿茶初期死亡率为负，是因为毛柄小勾儿茶缺少 I 龄级个体，且 II、III 龄级个体少，导致生命表里幼龄阶段的数据不符合数学假设，但这恰好反映出毛柄小勾儿茶种群的规模过小，年龄结构不稳定的现状。毛柄小勾儿茶龄级结构主要特征是幼苗稀少，更新困难，造成幼苗稀少的原因有：耐阴性差，难以在郁闭度高的生境中存活；种子未熟先落，活力差，发芽率低，且缺少有效的传播途径（党海山等，2005）。

此外，小勾儿茶和毛柄小勾儿茶为灌木或小乔木，对于光照的竞争在群落中处于弱势，调查中发现，现存的小勾儿茶和毛柄小勾儿茶多生长在河边、水沟旁、路边斜坡及悬崖上，这些地方种间竞争小，满足

了光照充足的条件，但生境受限且人为干扰强度大，很大程度上限制了其种群的发展。

3.2 小勾儿茶和毛柄小勾儿茶种群衰退特征

通过生存函数分析、种群动态变化指数和时间序列预测可以进一步反映种群数量在时间和空间上的变化规律和分布格局（赖江山等，2006），揭示物种与其生存环境的相互作用关系。生存函数反映出小勾儿茶种群在幼龄阶段就进入衰退期，与其幼龄阶段死亡率高且中龄和成龄阶段个体数量少的特征相吻合；毛柄小勾儿茶种群在 VI 龄级进入衰退期，相较于小勾儿茶更晚，表明二者所面临的环境压力有所不同。两个物种的危险率都在成龄阶段达到峰值，表明两物种在成龄阶段面临较大的生存压力，与羽叶丁香（*Syringa pinnatifolia*）（姜在民等，2018）种群的研究中结论一致，可能是因为到达了生理死亡年龄或受到环境的影响，比如特殊的生态位特征，使其难以从中龄级过渡到成龄级。

两个物种的动态变化指数 V_{pi}、V'_{pi} 均大于 0，V'_{pi} 明显低于 V_{pi}，随机干扰风险概率极大值 $P_{\max}$ 趋近于 0，表明二者从整体来看都属于抗干扰能力较低的增长型种群且对干扰敏感性较高。值得注意的是，毛柄小勾儿茶种群 I~III 龄级动态变化指数均小于 0，表明其幼龄期衰退明显。时间序列预测显示，在经过 2~8 个龄级后，小勾儿茶种群各龄级均表现出增长的趋势，与大苞山茶（*Camellia granthamiana*）（林春惠等，2023）的研究结果相似，表明在环境稳定的情况下，小勾儿茶种群数量能保持相对稳定并有所增长；毛柄小勾儿茶种群 VI~VIII 龄级个体数量有不同程度的增加，II~V 龄级个体数量呈减少趋势，尤其是 I~III 龄级个体缺乏补充，这与种群动态变化指数中 I~III 龄级数值为负相吻合，表明随着时间的推移，毛柄小勾儿茶种群将走向老龄化，如果幼苗得不到及时的补充，种群将面临衰退的风险，詹施施等（2023）对黑壳楠（*Lindera megaphylla*）的研究中有相似的结论。

3.3 小勾儿茶和毛柄小勾儿茶种群保护对策

综上所述，小勾儿茶和毛柄小勾儿茶种群的结构和动态既有相似之处也有不同，相似之处在于二者从中龄过渡到成龄阶段时死亡率达到最高，且二者成龄级个体数量都比较少；另外，二者对外界干扰都具有较高的敏感性。不同之处在于，二者幼龄级面临的压力有所差异：小勾儿茶种群幼龄个体相对较多，但死亡率更高，过渡到中龄个体的比例少；毛柄小勾儿茶幼龄个体明显缺乏，种群难以更新，趋于老龄化。因此，对小勾儿茶和毛柄小勾儿茶的保护应该根据实际情况采取不同的保护对策。针对小勾儿茶，要采取间伐，疏伐等措施，降低郁闭度，使幼苗得到合适的光照，提高幼苗的成活率。针对毛柄小勾儿茶，要加强提高种子萌发率和无性繁殖技术的研究，促进种群增长。同时，对于二者都应该加强就地保护，保护其原生境，优化保护区管理，避免人为干扰。例如，笔者在野外调查过程中发现，个别地区的小勾儿茶存在被当地居民砍伐当作薪柴利用的情况。因此，对于公众不仅要实施滥伐管控，更要加强宣传，提升保护意识；对于已经受到破坏的种群个体要采取补救措施，并加强保护措施跟踪管控。同时，要选择环境适宜、便于管理和进行科学研究的地点（林场、植物园等）开展迁地保护，保护地种植圃要合理布局，避免出现近交、杂交等导致遗传多样性的损失（杨文忠等，2014）。

致谢 感谢各调查样点所属国家级自然保护区或林业部门对我们野外工作给予的支持与帮助。感谢李根有老师在浙江省野外调查中给予的帮助。

参考文献

CHEN XD, 1998. A study on the method of quantitative analysis for plant population and community structure dynamics[J]. Acta Ecologica Sinica, 18(2): 104-107. [陈晓德，1998. 植物种群与群落结构动态量化分析方法研究[J]. 生态学报，18(2): 104-107.]

CHHETRI KP, BISTA R, CAIRNS MD, 2016. Population structure and dynamics of *Abies spectabilis* at treeline ecotone of Barun Valley, Makalu Barun National Park, Nepal[J]. Acta Ecologica Sinica,36(4): 269-274.

DANG HS, ZHANG YJ, JIANG MX, et al., 2005. A Preliminary Study on Dormancy and Germination Physiology of Endangered Species *Berchemiella wilsonii* (Schneid.) Nakai var．*pubipetiolata* H．Qian Seeds[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 23(4): 327-331. [党海山，张燕君，江明喜，等，2005. 濒危植物毛柄小勾儿茶种子休眠与萌发生理的初步研究[J].武汉植物学研究，23(4): 327-331.]

DIAO YF, LIU YK, LIU YL, et al., 2020. Population structure characteristics of *Taxus cuspidata*[J]. Scientia Sinica(Vitae), 50(4): 391-397. [刁云飞，刘延坤，刘玉龙，等，2020. 穆棱东北红豆杉种群结构特征[J]. 中国科学: 生命科学，50(4): 391-397.]

GAN QL, GUAN LF, 2007. Study on national protected plants in Shibalichangxia Nature Reserve[J]. Chinese Wild Plant Resources, 26(1): 8-11. [甘啟良，关良福，2007. 十八里长峡自然保护区国家级保护植物研究[J]. 中国野生植物资源，26(1): 8-11.]

HETT, JOAN M, LOUCKS OL, 1976. Age structure models of balsam fir and eastern hemlock[J]. Journal of Ecology, 64(3): 1029–1044.

HU LL, JIANG MX, HUANG HD, et al., 2003. Studies on traits of concomitant community of endangered plant *Berchemiella wilsonii*[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 21 (4): 327-331. [胡理乐，江明喜，黄汉东，等，2003. 濒危植物小勾儿茶伴生群落特征研究[J]. 武汉植物学研究，21 (4): 327-331.]

JIANG ZM, HE ZS, SU H, et al., 2018. Population structure and dynamic characteristics of endangered *Syringa pinnatifolia* Hemsl[J]. Acta Ecological Sinica, 38(7): 2471-2480. [姜在民，和子森，宿昊，等，2018. 濒危植物羽叶丁香种群结构与动态特征[J]. 生态学报，38(7): 2471-2480.]

JURRIAAN MDV, JOPPA LN, GITTLEMAN JL, et al., 2015. Estimating the normal background rate of species extinction[J]. Conservation Biology, 29(2): 452-62.

KANG M, 2006. Conservation genetic studies of there endangered plants[D]. Wuhan: Wuhan Botanic Garden, the Chinese Academy of Sciences: 132. [康明，2006. 三种濒危植物的保育遗传学研究[D]. 武汉：中国科学院研究生院（武汉植物园）：132.]

KANG M, JIANG MX, HUANG HW, 2005. Genetic diversity in fragmented populations of *Berchemiella wilsonii* var. *pubipetiolata* (Rhamnaceae)[J]. Annals of Botany, 95(7): 1145-1151.

KANG M, ZHANG JJ, WANG J, et al., 2006. Isolation and characterization of microsatellite loci in the endangered tree *Berchemiella wilsonii* var. p*ubipetiolata* and cross-species amplification in closely related taxa[J]. Conservation Genetics, 7(5): 789-793.

LAI JS, ZHANG M, XIE ZQ, 2006. Structure and distribution pattern of dominant populations in the evergreen broad-leaved forest in Three Gorges Reservoir Area[J]. Acta Ecological Sinica, 26(4): 1073-1079. [赖江山，张谧，谢宗强，2006. 三峡库区常绿阔叶林优势种群的结构和格局动态[J]. 生态学报，26(4): 1073-1079.]

LI HD, DING JL, HE X, 2012. *Berchemiella wilsonii*: a new plant record from Zhejiang discovered in Shengzhou[J]. Journal of Zhejiang A ＆ F University, 29(4):639-640. [李华东，丁建林，何晓，2012. 浙江嵊州发现濒危树种小勾儿茶[J]. 浙江农林大学学报，29(4): 639-640.]

LI JQ, JIANG MX, WANG HC, et al., 2004. Rediscovery of *Berchemiella wilsonii*（Schneid．)Nakai（Rhamnaceae）an endangered species from Hubei, China[J]. Acta Phytotaxonomica Sinica, (1): 86-88. [李建强，江明喜，王恒昌，等，2004. 濒危物种小勾儿茶的重新发现(英文)[J]. 植物分类学报, (1): 86-88.]

LIN CH, GU HY, YE QL, et al., 2023. Characteristics of population structure and dynamics in endangered *Camellia granthamiana*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 47(12): 1684-1692. [林春惠，顾惠怡，叶钦良，等，2023. 珍稀濒危植物大苞山茶种群结构与动态特征[J]. 植物生态学报，47(12): 1684-1692.]

LIU HY, YANG NK, ZHOU TC, et al., 2015. Population ecological characteristics of the rare and endangered plant *Camellia rhytidophylla* from Guizhou[J]. Plant Diversity and Resources, 37(6): 837-848. [刘海燕，杨乃坤，邹天才，等，2015. 贵州珍稀濒危植物皱叶瘤果茶的种群生态特征研究(英文)[J]. 植物分类与资源学报，37(6): 837-848.]

LIU S, 2018. Preliminary report on introduction and cultivation experiment of *Berchemiella wilsonii* [J]. Hubei Forestry Science and Technology, 47(3): 15-16. [刘赛，2018. 小勾儿茶引种栽培试验初报[J]. 湖北林业科技，47(3): 15-16.]

MAEQUES A, MARTINS IS, KASTER T, et al., 2019. Increasing impacts of land use on biodiversity and carbon sequestration driven by population and economic growth[J]. Nature Ecology & Evolution, 3(4): 628-637.

MALLAPATY S, 2020. China takes centre stage in global biodiversity push[J]. Nature, 78(7795): 345-346.

QIN AL, MA FQ, XU GX, et al., 2020. Population structure and dynamic characteristics of rare and endangered tree species *Michelia wilsonii* Finet et Gagn[J]. Acta Ecological Sinica, 40(13): 4445-4454. [秦爱丽，马凡强，许格希，等，2020. 珍稀濒危树种峨眉含笑种群结构与动态特征.生态学报，40(13): 4445-4454.]

QIN HN, ZHAO LN, 2017. Evaluating the threat status of higher plants in China[J]. Biodiversity Science, 25(7)：689-695. [覃海宁，赵莉娜，2017. 中国高等植物濒危状况评估[J]. 生物多样性, 25(7)：689-695.]

SCHENK JH, HOLZAPFEL C, HAMILTON GJ, et al., 2003. Spatial ecology of a small desert shrub on adjacent geological substrates[J]. Journal of Ecology, 91(3): 383-395.

SHI HW, JIANG MX, HU LL, 2007. Niche characteristics of *Berchemiella wilsonii* var．*pubipetiolata*， an endangered species in China[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 25(2): 163-168. [史红文，江明喜，胡理乐，2007. 濒危植物毛柄小勾儿茶的生态位研究[J]. 武汉植物学研究，25(2): 163-168.]

SUN ZM, LIU YH, PENG QT, et al., 2022. Competition status and conservation suggestions for wild plant with extremely small populations in primary communities in Hubei Province[J]. Biodiversity Science, 30(6): 76-83. [孙哲明，刘亚恒，彭秋桐，等，2022. 湖北省极小种群野生植物在原生群落中的竞争地位及保护建议[J]. 生物多样性，30(6): 76-83.]

WANG KX, WANG SQ, WANG YM, et al., 2024. Microsporogenesis, megasporogensis and development of male and female gametophytes of endangered *Berchemiella wilsonii*[J]. Bulletin of Botanical Research: 1-8. [王康鑫，王仕沁，王毅敏，等，2024. 濒危植物小勾儿茶的大小孢子发生和雌雄配子体发育[J]. 植物研究： 1-8.]

WANG LL, WANG L, ZHANG LF, et al., 2015. Structure and dynamic characteristics of *Gymnocarpos przewalskii*in different habitats[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 39(10): 980-989. [王立龙，王亮，张丽芳，等，2015. 不同生境下濒危植物裸果木种群结构及动态特征[J]. 植物生态学报，39(10): 980-989.]

WANG ML, QIU SY, SHI WJ, 2024. Impacts of future land use change on biodiversity in the Pearl River Delta[J/OL]. Acta Ecological Sinica, 44(16): 1-15 . [王鸣雷，邱思妍，史文娇，2024. 珠三角地区未来土地利用变化对生物多样性的影响[J/OL]. 生态学报，44(16): 1-15.]

WANG ST, LI LL, XU YZ, et al., 2022. Population structure and dynamic characteristics of extremely small populations of *Changiostyrax dolichocarpa* C．J．Qi[J]. Plant Science Journal, 40(5): 627-636. [王世彤，李玲丽，徐耀粘，等，2022.极小种群野生植物长果安息香种群结构与动态特征[J]. 植物科学学报,40(5): 627-636.]

WANG ST, WU H, LIU MT, et al., 2018. Community structure and dynamics of a remnant forest dominated by a plant species with extremely small population (*Sinojackia huangmeiensis*) in central China [J]. Biodiversity Science, 26 (7): 749-759. [王世彤，吴浩，刘梦婷，等，2018. 极小种群野生植物黄梅秤锤树群落结构与动态[J]. 生物多样性, 26 (7): 749-759.]

WANG YT, LIU XJ, TANG CF, et al., 2024. Community characteristics and population dynamics of *Acer miaotaiense*, an extremely small population species in Shennongjia, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 48 (1): 80-91. [王雨婷，刘旭婧，唐驰飞，等，2024. 神农架极小种群植物庙台槭群落特征及种群动态[J]. 植物生态学报, 48 (1): 80-91.]

WEI XZ, HUANG HD, JIANG MX, et al., 2008. Quantitative characteristics and spatial distribution Pat-terns of euptelea pleiospermum populations in riparian zones of the shennongjia area, central China[J]. Journal of Plant Ecology, 32(4):825-837. [魏新增，黄汉东，江明喜，等，2008.　神农架地区河岸带中领春木种群数量特征与空间分布格局[J]. 植物生态学报，32(4):825-837.]

WEI XZ, WU H, MENG HJ, et al., 2015. Regeneration dynamics of *Euptelea pleiospermum* along latitudinal and altitudinal gradients: Trade-offs between seedling and sprout[J]. Forest Ecology and Management, 353: 232-239.

WU CZ, HONG W, XIE JS, 2000. Life table analysis of *Tsuga longibracteata* populatio[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 11(3): 333-336. [吴承祯，洪伟，谢金寿，等，2000. 珍稀濒危植物长苞铁杉种群生命表分析[J]. 应用生态学报，11(3):333-336.]

XIE FL, ZHOU Q, SHI H, et al., 2019. Study on Habitat characteristics of endangered *Berchemiella wilsonii* (Schneid.) Nakai var. *pubipetiolata* H. Qian[J]. Hubei Forestry Science and Technolog, 48(4):19-23. [谢峰淋，周全，史航，等，2019. 濒危植物毛柄小勾儿茶生境特征研究[J]. 湖北林业科技，48(4):19-23.]

XU FH, KANG M, HUANG HW, et al.， 2006. Genetic diversity in fragmented populations of *Berchemiella wilsonii* var. *pubipetiolata*， an endangered plant endemic to eastern China[J]. Journal of Plant Ecology, 30 (1): 157-164. [许凤华，康明，黄宏文，等，2006. 濒危植物毛柄小勾儿茶片断化居群的遗传多样性[J].植物生态学报，30 (1): 157-164.]

XU WH, ZHAO L, HAN M, et al., 2023. Assessment of species conservation status by national park planning[J]. National Park, 1(1): 11-16. [徐卫华，赵磊，韩梅，等，2023. 国家公园空间布局物种保护状况评估[J]. 国家公园(中英文)，1(1): 11-16.]

YANG FX, WANG SQ, XU HG, et al., 1991. The theory of survival analysis and its application to life table[J]. Acta Ecologica Sinica, 11(2): 153-158. [杨凤翔，王顺庆，徐海根，等，1991. 生存分析理论及其在研究生命表中的应用[J]. 生态学报，11(2): 153-158.]

YANG WZ, KANG HM, XIANG ZY, 2014. Methods and techniques for conserving wild plant species with extremely small populations[J]. Journal of West China Forestry Science, 43(5): 24-29. [杨文忠，康洪梅，向振勇，等，2014. 极小种群野生植物保护的主要内容和技术要点[J]. 西部林业科学, 43(5): 24-29.]

YU DX, DU F, SHI M, et al., 2018. Community characteristics and population structure of *Ferrocalamus strictus*, a rare species in Mojiang, Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 42(9): 938-945. [喻丁香，杜凡，石明，等，2018. 云南墨江极小种群物种铁竹的种群结构与群落特征[J]. 植物生态学报,42(9): 938-945.]

YUAN CM, YANG GP, GENG YF, et al., 2022. Prediction of population dynamics of the endangered plant *Pterospermum kingtungense* using integral projection models[J]. Ecology and Environmental Sciences, 31(8): 1530-1536. [袁春明，杨国平，耿云芬，等，2022. 基于积分投影模型预测濒危植物景东翅子树的种群动态[J]. 生态环境学报, 31(8): 1530-1536.]

ZHANG WH, WANG YP, KANG YX, et al., 2004. age structure and time sequence prediction of population of an endangered plant, *Larix potaninii* var. *chinensis*[J]. Biodiversity Science, 12(3): 361-369. [张文辉，王延平，康

永祥，等，2004. 濒危植物太白红杉种群年龄结构及其时间序列预测分析[J]. 生物多样性，12(3): 361-369.]

ZHAN SS, WANG ST, ZHOU BG, et al., 2023. Community characteristics and population structure of *Lindera megaphylla* in Zhuxi, Hubei, China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 32(1): 113-122. [詹施施，王世彤，周本庚，等，2023. 湖北竹溪黑壳楠的种群结构与群落特征[J]. 长江流域资源与环境，32(1): 113-122.]

ZHANG J, SHANGGUAN TL, DUAN YH, et al., 2014. Age structure and dynamics of *Quercus wutaishanica* population in Lingkong Mountain of Shanxi Province， China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 25(11):3125-3130. [张婕，上官铁梁，段毅豪，等，2014. 灵空山辽东栎种群年龄结构与动态[J]. 应用生态学报，25(11): 3125-3130.]

ZHANG JF, GE SS, LIANG JH, et al., 2022. Population structure and dynamic characteristics of *Tilia amurensis* in broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 42(13): 5381-5390. [张金峰，葛树森，梁金花，等，2022. 长白山阔叶红松林紫椴种群结构与动态特征[J].生态学报，42(13): 5381-5390.]

ZHANG XN, HU XL, FANG GF, et al., 2023. Survey on the Germ Plasm Resources of *Berchemiella wilsonii* var. *pubipetiolata* in Anhui Qingliangfeng National Nature Reserve and Preliminary Strategies for the Population Conservation[J]. Anhui Forestry Science and Technology, 49(3):33-35. [章学农，胡小菱，方国富，等，2023. 安徽清凉峰国家级自然保护区毛柄小勾儿茶种质资源调查与种群保护初探[J]. 安徽林业科技，49(3): 33-35.]

ZHANG ZX, LIU P, CAI MZ, et al., 2008. Population quantitative characteristics and dynamics of rare and endangered *tsuga tchekiangensis* in jiulongshan nature reserve of China[J]. Journal of Plant Ecology, 32(5): 1146-1156. [张志祥，刘鹏，蔡妙珍，等，2008. 九龙山珍稀濒危植物南方铁杉种群数量动态[J].植物生态学报，32(5): 1146-1156.]

ZHAO Y, LIU JQ, CHEN XL, 2020. Population structure characteristics of *Picea purpurea* in the upstream of Taohe River[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 44(3): 266-276. [赵阳，刘锦乾，陈学龙，等，2020. 洮河上游紫果云杉种群结构特征[J]. 植物生态学报，44(3): 266-276.]

ZHU PG, QIAO Q, MA YP, et al., 2024. Population structure and dynamic characteristics of *Rhododendron griersonianum*: A plant species with extremely small populations[J]. Journal of West China Forestry Science, 53(1): 17-24. [朱培高，乔琴，马永鹏，等，2024. 极小种群野生植物朱红大杜鹃的种群结构与动态特征[J]. 西部林业科学, 53(1): 17-24.]

ZHU XL, AN SQ, ZHANG LX, et al., 1999. Population structure of tropical montane rainforest on Wuzhi Mountain of Hainan[J]. Chinese Journal of Applied Ecology , 10(6): 641-644. [朱学雷，安树青，张立新，等，1999. 海南五指山热带山地雨林主要种群结构特征分析[J]. 应用生态学报，10(6): 641-644.]